

具有部分超结的新型 SiC SBD 特性分析^{*}

杨银堂 耿振海[†] 段宝兴 贾护军 余 涔 任丽丽

(西安电子科技大学微电子学院 宽禁带半导体材料与器件重点实验室 西安 710071)

(2009 年 3 月 30 日收到, 2009 年 5 月 13 日收到修改稿)

提出了一种具有部分超结(super junction, SJ)结构的新型 SiC 肖特基二极管,命名为 SiC Semi-SJ-SBD 结构,通过将常规 SBD 耐压区分为常规耐压区和超结耐压区来减小导通电阻,改善正向特性.利用二维器件模拟软件 MEDICI 仿真分析,研究了不同超结深度和厚度时击穿电压(V_B)和比导通电阻(R_{on-sp})与常规结构的 SBD 比较得出,半超结结构可以明显改善 SiC 肖特基二极管特性,并得到优化的设计方案,选择超结宽度 $2W$ 为 $2\ \mu\text{m}$ 、 $3\ \mu\text{m}$,超结深度大于 $5\ \mu\text{m}$,可以使 R_{on-sp} 降低量大于 10%,而且保持 V_B 基本不变(降低量小于 4%).

关键词: SiC 肖特基二极管, super junction, 导通电阻, 击穿电压

PACC: 7340L, 7280

1. 引言

碳化硅具有优良的物理和电学特性,宽禁带、高热导率、大的饱和漂移速度和高临界击穿电场等优点,使其成为制作高功率、高频、耐高温、抗辐射器件的理想半导体材料^[1].目前 SiC 半导体材料生长和外延技术的研究取得了突破性进展,基本解决了器件制作中的材料问题,对 SiC 的研究重点已转移到器件制作的基本工艺技术上^[2,3],如掺杂、氧化、刻蚀、金属半导体接触和封装等,以发挥 SiC 半导体材料的潜在优势,制作出高性能器件和电路. SiC 器件已成为目前半导体研究的热点和前沿领域之一.

肖特基势垒二极管为金属-半导体接触的多数载流子器件,开关功率损耗低,是高频电路和微波领域的基础器件.由于传统的 Si SBD 击穿电压较低($< 100\ \text{V}$),通态电阻较高,不适于在高温下工作(工作温度 $< 200^\circ\text{C}$),应用上受到限制.而 SiC SBD 弥补 Si SBD 的不足,它是高压快速与低功率损耗、耐高温等优点相结合的理想器件.近年来,在理论和实验研究方面,对碳化硅开关器件,特别是肖特基二极管(SBD),进行了大量研究,获得了较好的结果^[4-7].

SiC SBD 的一个重要的设计目标是,获得高的击穿电压同时保持尽可能低的导通电阻.然而,由于

理论极限的限制, SiC 的导通电阻 R_{on} 正比于击穿电压 V_B 的二次方^[8].在设计和优化 SBD 过程中,要进行提高击穿电压和降低导通电阻的折中.其中电场优化是常用的提高击穿电压的主要方法,在 Si 中有很多研究^[9,10]. Super-Junction^[11-14]是一种常用的电场优化方法,它是将传统 VDMOS 中的 n 型漂移区替换为由 n/p 柱相互交替的漂移区,提高了外延层掺杂浓度同时不改变器件的击穿电压,能够很好解决导通电阻和击穿电压之间的矛盾.但由于 Super-Junction 工艺难度比较大,而且制造成本随深宽比增加而增加,而半超结结构可以满足 V_B 要求同时有效减小深宽比.

本文提出了一种新型的 SiC Semi-SJ-SBD 结构,使其在满足一定击穿电压下,导通电阻 R_{on-sp} 降低.利用二维器件仿真软件 MEDICI 对 SiC Semi-SJ-SBD 结构进行了模拟,仿真结果表明, SiC Semi-SJ-SBD 较常规结构的击穿电压和导通电阻都有很大改善.

2. 器件结构

图 1(a)为常规肖特基二极管(SBD)器件剖面图,图 1(b)为本文提出的新型 Semi-SJ-SBD 器件剖面图.与图 1(a)结构相对比, Semi-SJ-SBD 将器件的耐压区(N_{drift})分成两个部分:常规耐压区(BAL)和

^{*} 国家部委预研项目(批准号 51308030201, 9140A08050509DZ0106)资助的课题.

[†] E-mail: gengzhenhai123@163.com

超结耐压区(交替的 n/p 柱), 其中 N ,P 柱浓度高出 N_{drift} 约一个数量级. 图 1(b) 中虚线所框区域为 Semi-SJ-SBD 结构的一个基本单元, 本文以它为基本器件结构, 通过 MEDICI 仿真获得了不同 n/p 柱宽度和深度下的击穿电压 V_{B} 和比导通电阻 $R_{\text{on-sp}}$ 之间的关系. 其中, W 为 N/P 柱宽度, N_{D} , N_{A} 分别为 N, P 柱的掺杂浓度, 常规漂移区浓度为 N_{drift} .

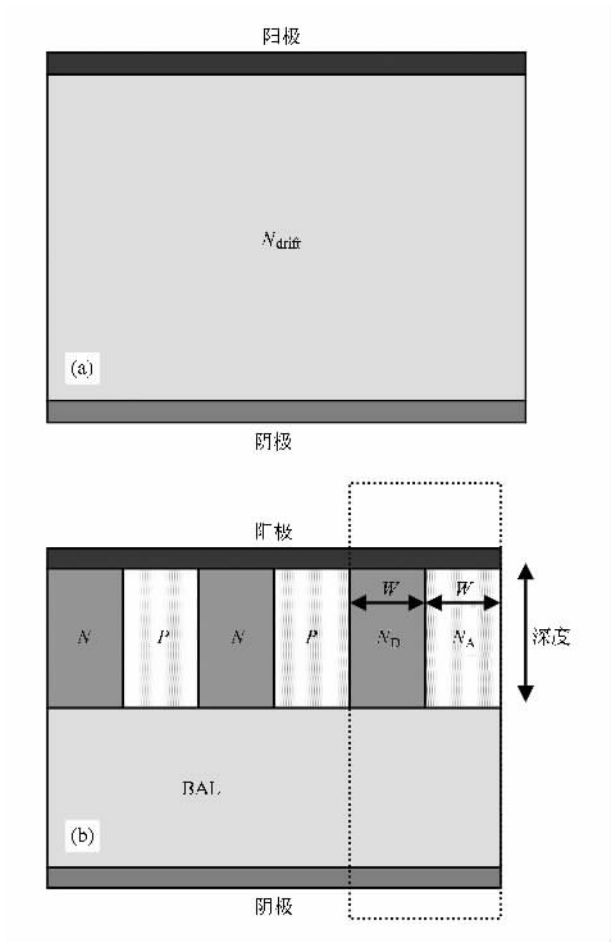


图 1 常规 SBD 与 Semi-SJ-SBD 结构剖面图 (a) 常规 SBD (b) Semi-SJ-SBD

当器件反偏时, 由于 Semi-SJ-SBD 同时存在纵向和横向的 pn 结, 在纵向和横向建立了电场, 使器件在较低的反向偏压下可以全部耗尽, 电场分布均匀. 器件处于正向偏置时, P 柱的引入虽然减小了电流流过面积, 但 N 柱的掺杂浓度 N_{D} 与 N_{drift} 相比提高了一个数量级左右, 所以总体上导通电阻降低很大. 对于 $R_{\text{on-sp}}$ 可以通过以下公式进行计算^[11]: 总的比导通电阻 $R_{\text{on-sp}}$ 为 SJ 部分(超结耐压区) 和 BAL 部分(常规耐压区) 比导通电阻之和.

$$R_{\text{on}} = R_{\text{on-SJ}} + R_{\text{on-BAL}}, \tag{1}$$

$$R_{\text{on-BAL}} = \frac{t_{\text{BAL}}}{q\mu_n N_{\text{BAL}}}, \tag{2}$$

$$R_{\text{on-SJ}} = \frac{1}{q\mu_n N_{\text{SJ}}} \times \frac{t_{\text{SJ}}}{W_{\text{n-undep}} z} \times 2Wz, \tag{3}$$

其中

$$W_{\text{n-undep}} = W - W_{\text{n-dep}},$$
$$W_{\text{n-dep}} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_{\text{D}} + N_{\text{A}}}{N_{\text{D}} N_{\text{A}}} \right) V_{\text{bi}}},$$
$$V_{\text{bi}} = \frac{k_0 T}{q} \ln \frac{N_{\text{D}} N_{\text{A}}}{n_i^2},$$

t 为 SJ 和 BAL 的厚度, $W_{\text{n-dep}}$ 为 SJ 横向耗尽区宽度, V_{bi} 为 SJ 内建电势.

然而, 由于 SiC 独特的性质, 在室温时杂质不完全电离, 公式中的浓度应按其已电离杂质浓度来计算. 在这里取其电离率为 60%. 通过理论计算分析可以看出, 这种结构可以有效减小 $R_{\text{on-sp}}$, 而且计算结果与仿真具有一致性. 如表 1 所示, 计算值比仿真值小一个常数. 这是由于以上对于 $R_{\text{on-sp}}$ 的公式推导, 只考虑了 SJ 和 BAL 漂移区电阻, 没有考虑到肖特基接触部分电阻和 SJ 与 BAL 过渡区的电流分布问题等.

表 1 2 W = 2 μm 模型计算 $R_{\text{on-sp}}$ 与仿真结果比较

$t_{\text{SJ}}/\mu\text{m}$	$R_{\text{on-sp}}/\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$		
	计算值	仿真值	差
0	2.3148	2.8985	0.5837
5	1.4589	2.6094	1.1505
7	1.1164	2.2238	1.1074
10	0.6027	1.1938	0.5911

3. 结果分析及讨论

以下各图比较了常规 SiC SBD、超结 SiC SBD 和 SiC Semi-SJ SBD, 器件的总厚度为 10 μm, 其中 SJ₀ 表示没有超结的常规 SiC SBD, SJ₅ 和 SJ₇ 分别表示超结深度为 5 μm 和 7 μm 的 SiC Semi-SJ SBD, SJ₁₀ 表示完全的超结 SiC SBD.

3.1. 纵向电场分布

图 2 为 n, p 区宽度 2 W = 2 μm 时 p 区边缘的电场分布图. 其中, SJ₀, SJ₅, SJ₇, SJ₁₀ 分别表示超结深度为 (常规 SBD) 5 μm, 7 μm, 10 μm. 可以看出, SJ₅, SJ₇, SJ₁₀ 由于引入了超结, 使阳极的表面(结深 0 μm

处)电场比 SJ_0 降低,并且在器件的体内产生一个新的电场峰值,使整体的电场分布相比常规 SBD 较平坦.

比较 SJ_5 , SJ_7 , SJ_{10} 电场分布,可以看出,体内产生的电场峰值出现的位置与超结的深度有关,都出现在超结的结深处.新电场峰值的引入改变了电场分布,使得到的击穿电压基本相同,并与超结的深度无关.超结的引入使电场分布均匀,减缓了常规 SBD 的漂移区电场的下降趋势.

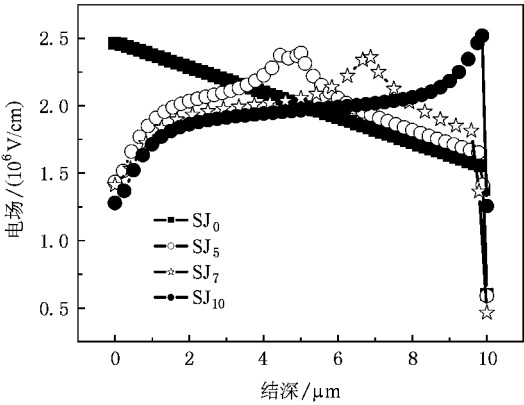


图2 结宽 $2W=2\mu\text{m}$ 时,不同结深的纵向电场分布

3.2. V_B , $R_{\text{on-sp}}$ 与结深的关系

图3为 V_B 和 $R_{\text{on-sp}}$ 随超结深度的变化关系.图中分别列出了宽度 $2W$ 为 $1\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ 时的 V_B 和 $R_{\text{on-sp}}$.从图中可以看出, V_B 随着 SJ 深度的增加基本不变.如对于 $2W=2\mu\text{m}$,超结深度从 $5\mu\text{m}$ 增加到 $10\mu\text{m}$ 时, V_B 从 1960V 降低到 1954V ,降低量约为 0.3% . SJ 深度增加对 V_B 几乎没有影响.而 V_B 随 SJ 宽度增加呈下降趋势,具体原因会在后边的讨论中给出.

关于比导通电阻 $R_{\text{on-sp}}$,可以看出,随着 SJ 深度增加, $R_{\text{on-sp}}$ 明显降低.如对于 $2W=2\mu\text{m}$,超结深度从 $5\mu\text{m}$ 增加到 $10\mu\text{m}$ 时, $R_{\text{on-sp}}$ 从 $2.61\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 降低到 $1.19\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$,而且比 SJ_0 (常规结构) $2.9\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 降低了至少 10% .导通电阻 R_{on} 是常规漂移区电阻 $R_{\text{on-BAL}}$ 和超结漂移区电阻 $R_{\text{on-SJ}}$ 的串联,由于超结漂移区的掺杂浓度高出常规漂移区一个数量级,对于同样深度漂移区, $R_{\text{on-SJ}}$ 小于的 $R_{\text{on-BAL}}$.随着 SJ 深度增加, $R_{\text{on-SJ}}$ 的增加量小于 $R_{\text{on-BAL}}$ 的减少量,所以,总的 R_{on} 随 SJ 深度增加而减小.对于导通电阻的理论公式已经给出(1)–(3)式,并且在表1中已经比较

了理论计算与仿真的结果,两者基本一致(1)–(3)式可以很好地描述 $R_{\text{on-sp}}$.

从图3可以得到, SJ 结深的变化对击穿电压影响不大,但对 R_{on} 影响较大, R_{on} 随 SJ 深度的增加明显降低.从图中可以看出,随超结深度增加, $R_{\text{on-sp}}$ 从 $2.90\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 降低到 $1.19\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$.

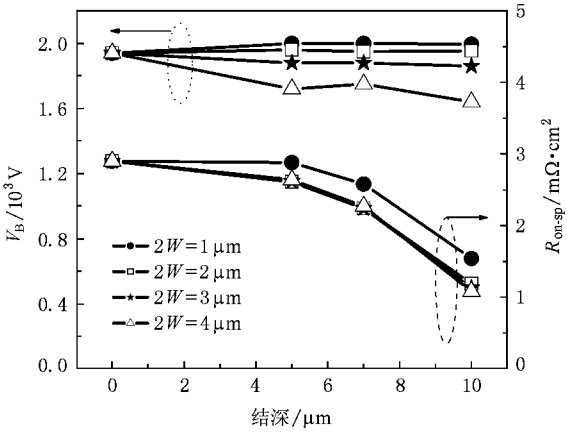


图3 V_B , $R_{\text{on-sp}}$ 与结深的关系

3.3. V_B , $R_{\text{on-sp}}$ 与结宽 $2W$ 的关系

图4为 V_B 和 $R_{\text{on-sp}}$ 随超结宽度($2W$)的变化关系.图中分别列出了结深为 $0\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $7\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ 时的 V_B 和 $R_{\text{on-sp}}$.从图中可以看出,随着 SJ 宽度增加,击穿电压 V_B 降低.以结深 $5\mu\text{m}$ 为例,当超结宽度 $2W$ 从 $1\mu\text{m}$ 增加到 $4\mu\text{m}$ 时, V_B 从 2000V 降低到 1720V ,降低量高于 15% .这是因为,由于随着超结宽度增加,器件 SJ 部分的横向电场分布不均匀,与常规结构相比明显降低,中心与边缘的差距变大,电场分布在 pn 结界面附近比较平坦,但在 n/p 柱的边缘变化较大.总的二维电场分布不再平坦,使在 $2W=4$ 时 p 柱边缘的电场比 $2W=2$ 时小,从而积分得到的击穿电压降低.

对于 $R_{\text{on-sp}}$,可以看出,在 $2W<2\mu\text{m}$ 时, $R_{\text{on-sp}}$ 随 $2W$ 的增加而减小;在 $2W>2\mu\text{m}$ 时, $R_{\text{on-sp}}$ 随 $2W$ 的增加基本不变.这一现象与正向时,超结中存在横向耗尽区有关.由于超结存在横向的耗尽区,减小了导通电流的面积,会导致导通电阻增加.对于相同的 n , p 柱掺杂浓度,超结横向耗尽区宽度是一定的,在 $2W<2\mu\text{m}$ 时,由于宽度较小,耗尽区占据的面积不可忽略,所以随着 $2W$ 减小 R_{on} 会增加;当 SJ 宽度增加到一定值时,比如 $2W>2\mu\text{m}$,由于宽度较大,耗

尽区占据的面积较小,相比之下可以忽略,所以随着 $2W$ 增加 R_{on} 变化不大.

可以得出结论 SJ 结宽 $2W$ 的变化对 V_B 影响较大,随 $2W$ 的增大 V_B 从 2000 V 降低到 1720 V. SJ 结宽 $2W$ 的变化对 R_{on-sp} 影响不大,在 $2W < 2 \mu\text{m}$ 时, R_{on-sp} 随 SJ 宽度的减小略有增加(从 $2.61 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 增加到 $2.88 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) 增加量约为 10%,在 $2W > 2 \mu\text{m}$ 时, R_{on-sp} 随 SJ 宽度增加保持不变.

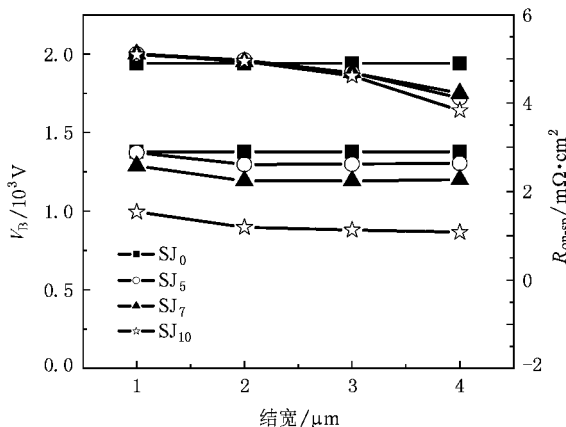


图 4 V_B , R_{on-sp} 与结宽 $2W$ 的关系

从图 3 和图 4 可以得出结论 SJ 结深对 R_{on-sp} 影响较大, SJ 结宽对 V_B 影响较大,对 R_{on-sp} 有较小影响.通过优化可以得到,在进行器件设计时,选取 SJ 宽度 $2W$ 在 $2 \mu\text{m}$ $3 \mu\text{m}$,可以使击穿电压降低量小于 4%,同时选择 SJ 深度大于 $5 \mu\text{m}$,就可以使导通电阻减小至少 10% 以上.

3.4. 正向特性

从图 5 可以看出,对于同一结宽($2W$),随着结深增加,在相同电流时,正向压降减小;对于同一结深(SJ_7 , SJ_{10})随着结宽 $2W$ 增加,在相同电流时,正向压降减小.由于 SJ 越深 $2W$ 越大,得到的导通电阻就越小,所以在同样的电流密度下,器件的正向压降越小.

当器件处于正向时,超结的横向 pn 结的耗尽区占据部分的电流路径,所以 $2W$ 应该越大越好,但随着 $2W$ 的增大,电场分布会变的不均匀,击穿电压 V_B 又会下降.所以要综合考虑 $2W$ 对 R_{on-sp} 和 V_B 的影响,进行折中.从图 4 可以看出,选择 $2W = 2 \mu\text{m}$ 比较合适,既可以维持与常规 SBD 几乎相同的击穿

电压,又能保证 R_{on-sp} 有明显地减小.

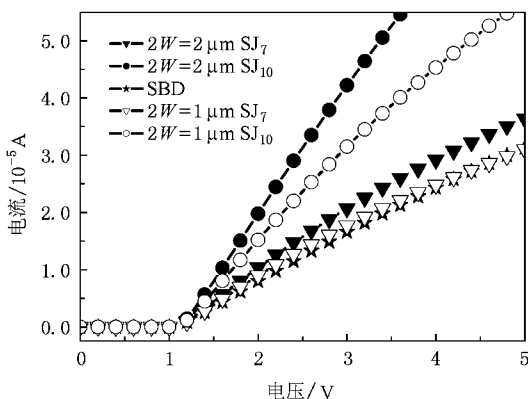


图 5 正向特性曲线

3.5. V_B - R_{on} 关系

图 6 为已报道 SiC SBD 以及 SiC Semi-SJ-SBD 的 R_{on-sp} 与击穿电压 V_B 的折中关系,图中直线 4H-SiC limit 是单极 SiC 器件的导通电阻与击穿电压的关系极限^[8]:

$$R_{sp on} = \frac{4V_B^2}{\mu\epsilon_s E_c^3} \quad (4)$$

在上式中,电子迁移率 μ 取 $1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 临界击穿电场 E_c 取 $2.49 \text{ MV}/\text{cm}$ ^[15].从图中可以看出, Semi-SJ-SBD 与文献[5—7]相比,导通电阻明显降低;文献[4]由于采用 Mo 接触,并在高温下退火,有效控制了肖特基势垒高度,同时也得到了较低的导通电阻.可以看出, Semi-SJ-SBD 可以很好的改进 R_{on-sp} 与 V_B 的折中,它得到的导通电阻值接近 4H-SiC 的理论极限值.

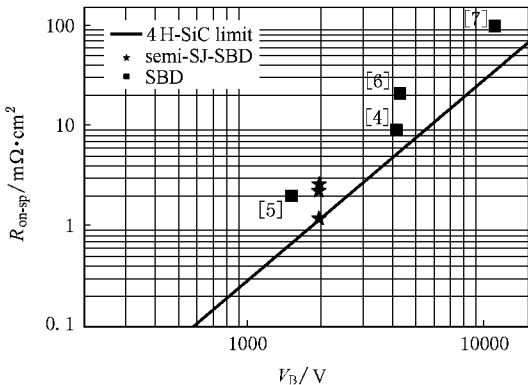


图 6 V_B - R_{on} 折中关系

4. 结 论

通过在常规 SiC SBD 中引入 SJ 作为耐压层,改善了漂移区电场分布,减小了导通电阻,改善正向特性.与常规结构的 SBD 比较,SJ 结深对 $R_{\text{on-sp}}$ 影响较大,结宽对 V_B 影响较大;随着超结深度增加(从

$5\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $10\text{ }\mu\text{m}$),导通电阻减小(从 2.90 到 $1.19\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$),击穿电压基本不变,随着超结宽度增加(从 $1\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $4\text{ }\mu\text{m}$),击穿电压有所下降(从 2000 到 1720 V),导通电阻在宽度大于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时保持不变. SJ 深度大于 $5\text{ }\mu\text{m}$,SJ 宽度 $2W$ 为 $2\text{—}3\text{ }\mu\text{m}$,即可使 $R_{\text{on-sp}}$ 比常规 SiC SBD 低量 10% 以上,而且保持 V_B 与常规结构基本相同(降低量小于 4%).

- [1] Baliga B J 1989 *IEEE EDL* **10** 455
- [2] Ma G L, Zhang Y M, Zhang Y M, Ma Z F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4119 (in Chinese) [马格林、张玉明、张义门、马仲发 2008 物理学报 **57** 4119]
- [3] Jia R X, Zhang Y M, Zhang Y M, Wang Y H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6649 (in Chinese) [贾仁需、张义门、张玉明、王悦湖 2008 物理学报 **57** 6649]
- [4] Tomonori Nakamura, Toshiyuki Miyagi *et al* 2005 *IEEE Electron Device Letters* **26** 99
- [5] Zhu L, Paul Chow T 2008 *IEEE Transactions on Electron Devices* **55** 1871
- [6] Wu J, Fursin L, Li Y 2004 *Mater Sci. Forum* **457-460** 1109
- [7] Zhao J H, Alexandrov P, Li X 2003 *IEEE Electron Device Letters* **24** 402
- [8] Baliga B J 1996 *Power Semiconductor Devices* (PWS :Boston)
- [9] Duan B X, Zhang B, Li Z J 2005 *Solid-State Electronics* **49** 1965
- [10] Duan B X, Yang Y T, Zhang B 2009 *IEEE Electron Device Letters* **30** 305
- [11] Yu L C, Sheng K 2008 *IEEE Transactions on Electron Devices* **55** 1961
- [12] Fang J, Qiao M, Li Z J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 656 (in Chinese) [方 健、乔 明、李肇基 2006 物理学报 **55** 656]
- [13] Zhu L, Peter Losee, Paul Chow T 2004 *International Journal of High Speed Electronics and Systems* **14** 865
- [14] Ma L, Gao Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 529 (in Chinese) [马 丽、高 勇 2009 物理学报 **58** 529]
- [15] Konstantinov A O, Wahab Q 1998 *Journal of Electronic Materials* **27** 335

Characteristics of a SiC SBD with semi-superjunction structure^{*}

Yang Yin-Tang Geng Zhen-Hai[†] Duan Bao-Xing Jia Hu-Jun Yu Cen Ren Li-Li

(School of Microelectronics, Xidian University, Key Lab of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Xi'an 710071, China)

(Received 30 March 2009; revised manuscript received 13 May 2009)

Abstract

A novel SiC semi-superjunction-Schottky Barrier Diode (Semi-SJ-SBD) structure is proposed, which is the combination of super-junction (SJ) structure and conventional drift region structure. The proposed structure can significantly reduce the specific on-resistance ($R_{\text{on-sp}}$) and improve the forward characteristics. The breakdown voltage (V_B) and specific on-resistance ($R_{\text{on-sp}}$) in different SJ depth and width are studied using two-dimensional simulator Medici and compared with conventional SiC SBD. The results show that $R_{\text{on-sp}}$ is greatly reduced (greater than 10%) with V_B unchanged (less than 4%) when the SJ width is chosen as $2\text{—}3\text{ }\mu\text{m}$ and SJ depth is deeper than $5\text{ }\mu\text{m}$.

Keywords : SiC SBD, super junction, specific on-resistance, breakdown voltage

PACC : 7340L, 7280

^{*} Project supported by the National Pre-Research Foundation (Grant Nos. 51308030201, 9140A08050509DZ0106).

[†] E-mail : gengzhenhai123@163.com